

Prestaciones de un motor de encendido por compresión alimentado con éster metílico de girasol y orujo de forma comparativa con combustible diésel

Iosvani López Díaz¹; Cándido E. Quintana Pérez²; Lizet Rodríguez Machín³; María del P. Dorado Pérez⁴; Jorgelina Pascualino⁵

^{1,3}Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA), Universidad Central de las Villas, Cuba.

iosvanild@uclv.edu.cu; pilar.dorado@uco.es

²Director de Investigación de Postgrado, Universidad Central del Este; San Pedro de Macorís, República Dominicana.

cquintana@uce.edu.do

⁴Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada, Área de Máquinas y Motores térmicos, Universidad de Córdoba, España. lizeirm@uclv.edu.cu

⁵Departamento de Química, Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, España. Jorgelina.pascualino@urv.es

Recibido: 02 may. 2014

Aceptado: 03 jun. 2014

RESUMEN

El biodiésel es un biocombustible que puede sustituir al gasoil sin modificaciones significativas en Motores de Combustión Interna, esto ha hecho que muchos investigadores orienten esfuerzos a su obtención a partir de diferentes materias primas y evaluación en instalaciones experimentales, ya sea puro o mezclado con gasoil. En este artículo se estudian las prestaciones obtenidas en un motor diésel Perkins AD 3–152 acoplado a un freno dinamométrico Froment NJF- XT 200 con el empleo de gasoil, biodiésel derivado de aceite de orujo y girasol a partir de una reacción con metanol y mezclas de ambos combustibles en una proporción 20% de biodiésel y 80% de diésel (B20). El biodiésel empleado fue obtenido en condiciones de laboratorio a partir de un estudio previo de optimización de las cantidades de sustancias que intervienen en la reacción y la cinética de la misma, para este fin se empleó una relación peso hidróxido de potasio-aceite y metanol-aceite de 1,3% y 30% respectivamente. A partir de los ensayos se obtuvieron las curvas de potencia y consumo específico de combustible donde se pudo verificar una reducción de la potencia máxima entregada de un 5% y 7% durante su funcionamiento con B20 de orujo y girasol; mientras que con biodiésel puro (B100) resultó de un 7% y 9% respectivamente. Y en el caso del consumo específico de combustible este se incrementó en un 9% y 11% cuando se empleó B20 y en un 14% y 15% para el caso del B100 de orujo y girasol respectivamente.

PALABRAS CLAVE: Biodiésel; Metil éster; Potencia; Consumo específico; Par motor

ABSTRACT

Performance of a compression ignition engine fueled with sunflower methyl ester residue comparatively with diesel fuel. Biodiesel is a biofuel that can replace oil with no significant changes in Internal Combustion Engines; this has led some investigators to guide efforts to obtain them from different raw materials and assessment in experimental facilities, either pure or mixed with diesel. This article discusses the benefits obtained by AD 3-152 Perkins diesel engine coupled to a dynamometer Froment NJF-XT 200 with the use of diesel, biodiesel derived from pomace and sunflower oil and residue from a reaction with methanol and mixtures of both fuels in a proportion of 20% biodiesel and 80% diesel (B20). The biodiesel used was obtained under laboratory conditions from a previous study of optimizing the quantities of substances involved in the reaction and the kinetics of the same, for this purpose a weight potassium hydroxide-oil ratio was used and methanol-oil in 1.3% and 30% respectively. From testing, the power curves and specific fuel consumption were obtained in which a reduction of the maximum power output of 5% and 7% during operation with B20 residue and sunflower could be verified. While pure biodiesel (B100) turned 7% and 9% respectively. And in the case of specific fuel consumption, this increased by 9% and 11% when B20 was used and 14% and 15% in the case of B100 pomace and sunflower respectively.

KEYWORDS: Biodiesel; Methyl ester; Power; Specific consumption; Engine torque

INTRODUCCIÓN

Los primeros diseños de motores de Rudolph Diésel usaban polvo de carbón como combustible. Sin embargo en la feria mundial de 1989 en Paris, Francia, Diésel alimentó su nuevo motor con aceite de maní. Luego se encontró que el Petróleo combustible (hoy conocido como gasoil), un subproducto del proceso de producción de gasolina exhibía características muy similares a las de los aceites vegetales. El inesperado subproducto se convirtió rápidamente en el combustible para los motores Diésel y por los próximos 70 años todas las investigaciones se dirigieron a diseñar motores que funcionaran con la mayor eficiencia empleando este combustible.

En los últimos años la conciencia de la problemática energética y ambiental ha llevado a retomar la idea inicial de Rudolph Diésel del empleo de aceites vegetales en los motores Diésel, encontrándose ahora el inconveniente de las diferencias entre las propiedades del aceite vegetales y el gasoil y el diseño de los motores para este último tipo de combustible. Esto ha hecho que se desarrollen investigaciones para modificar las propiedades de los aceites vegetales acercándolas a las del gasoil. Un buen resultado se ha conseguido con la reacción de transesterificación de los aceites vegetales o grasa animal, mediante la cual en presencia de un catalizador se hace reaccionar el aceite o grasa con alcohol, obteniendo un combustible conocido como biodiesel y que es considerado en la actualidad alternativo del gasoil. Numerosas han sido las investigaciones realizadas por diferentes autores en torno a la reacción de transesterificación con aceites vegetales de diferentes naturalezas, (De and K. 1999; Darnoko D and M 2000; Dorado 2001; Dorado, de Almeida et al. 2002; Encinar, Gonzalez et al. 2002; Peterson, Cook et al. 2002; Dorado, Ballesteros et al. 2004; Dorado, Ballesteros et al. 2004; Mittelbach and Remschmidt 2004; Gerpen 2005; Ramadhas, Jayaraj et al. 2005; Arzamendi, Arguiñarena et al. 2006; Canakci and Hosoz 2006; Prakash, Arul Jose et al. 2006; Bouaid, Martinez et al. 2007; Sivaprakasam and Saravanan 2007; Berchmans and Hirata 2008; Demirbas 2008; Om Tapanes, Gomes Aranda et al. 2008; Pinzi, Priego Capote et al. 2008; Sabudak and Yildiz 2010).

Este biocombustible, junto a otros, ha sido cuestionado teniendo en cuenta que las materias primas para su obtención pueden constituir recursos alimenticios, o por la posible utilización de tierras fértiles para su obtención. Sin dudas con el uso de los biocombustibles se genera un nivel de competencia en torno a la alimentación humana, pero esto puede estar perfectamente controlado por las legislaciones y voluntades políticas de los gobiernos en los diferentes países. Además existen diferentes posiciones de la comunidad científica internacional con respecto a este tema, dentro de las que se destacan la utilización de estas alternativas energéticas, que sin dudas resultan renovables, precisamente para las producción directa de alimentos, supliendo las necesidades energéticas asociadas al transporte y mecanización del sector agrícola (López 2006; Piloto. 2009). Y por otro lado, varias materias primas que no requieren de tierras fértiles para su cultivo y a su vez no constituyen alimentos, están siendo utilizadas para la producción de biocombustibles (Kumar and Sharma 2005; Usta 2005; Haldar 2008).

En torno a estos estudios realizados por la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), contabilizaron 41.88 millones de km² de tierras disponibles para la agricultura, de la cual solo se empleaba hace cuatro años 15.06 millones de km², mientras que en esta fecha se utilizaba para la producción de biocombustibles solo 0,11 millones de km², lo cual representa menos del 1% de la superficie cultivable. Cálculos estimados de la misma organización revelan que para el 2030 se emplearán cerca de 0,325 millones de km² de tierras con fines energéticos, lo cual sigue siendo inferior a un 2% del total de superficie agrícola (Konandreas 2007; FAO 2008).

Una vez obtenido el biodiesel se hace necesario estudiar el comportamiento de los motores de combustión interna con su empleo, lo cual constituye su finalidad, por tal motivo resulta importante conocer cómo afecta el empleo de este combustible a los principales parámetros de funcionamiento del motor como es el caso de la potencia, par motor, y consumo de combustible. Numerosas investigaciones lo reflejan (Altın, Çetinkaya et al. 2001; Dorado, Ballesteros et al. 2003; Labeckas and Slavinskas 2006; Agarwal and Agarwal 2007; Agarwal, Kumar et al. 2008; Canakci, Sayin et al. 2008; Sureshkumar, Velraj et al. 2008; Geo, Nagarajan et al. 2009; Gokalp, Soyhan et al. 2009; Öner and Altun 2009; Peterson, Lee et al. 2009; Aydin and Bayindir 2010), sin embargo los resultados dependen de las condiciones propias de experimentación, específicamente de las características del motor ensayado.

El presente trabajo pretende estudiar comparativamente el efecto sobre las prestaciones de un motor de encendido por compresión con relación al combustible tradicional cuando se emplea biodiesel puro y mezclas biodiesel-gasoil en proporción 20% de biodiesel, 80% diésel. Y tomando en consideración la problemática antes mencionada referida a la controversia que hoy existe entre los fines energéticos y alimenticios de estos recursos, se tomarán en cuenta dos aceites vegetales para la obtención del biodiesel, uno de ellos muy conocido y abordado en

la bibliografía y que constituye sin dudas un recurso alimenticio, el aceite de girasol (Vicente, Coteron et al. 1998; Vicente, Martinez et al. 2005; Arzamendi, Arguiñarena et al. 2006; Hasimoglu, Ciniviz et al. 2008).

Y por otro lado el aceite de orujo, el cual se prevé pueda convertirse en un candidato potencial para la producción de biodiesel, ya que el mismo, para ser comestible tiene que ser sometido a un vacío estricto con la utilización de absorbentes adecuados para retirar el contenido de hidrocarburos aromáticos altamente cancerígenos (benzopirenos), generados por procesos térmicos anteriores a su obtención, lo cual lleva implícito muy altos costos en la obtención de un aceite de calidad aceptable. Actualmente, el elevado precio de venta del aceite compensa este incremento de sus costos de obtención, pero cualquier variación en los mismos convertiría este aceite en inviable para consumo humano.

De este tipo de aceite existe un conocimiento limitado acerca de su empleo para la obtención de biodiesel, y aún menos en lo relativo a su posterior evaluación en el motor.

2. Materiales y métodos

2.1. Condiciones experimentales del banco de prueba

Los ensayos en banco de prueba fueron realizados en las instalaciones de laboratorio del Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada, Área de Máquinas y Motores Térmicos, Universidad de Córdoba, España. Para llevar a cabo los ensayos se utilizó un motor diésel agrícola Perkins modelo AD 3-152. Sus principales características se muestran en la Tabla 1. Esta instalación experimental así como el procedimiento a seguir han sido los utilizados por Dorado 1995; Dorado 2002; Dorado, Arnal Almenara et al. 2002; Dorado, Ballesteros et al. 2003.

Potencia máxima	34 kW a 2250 rpm
Cilindros	3 en línea dispuestos en vertical
Ciclo	4T
Refrigeración	Por agua (temperatura: 75-85 °C)
Inyección	Directa
Lubricación	Por aceite
Diámetro del pistón (mm)	91,44
Carrera (mm)	127
Cilindrada (cm³)	2500
Relación de compresión	18,5:1
Orden de encendido:	1, 2, 3
Bomba de inyección	DPA – CAV. Sincronización: 24º APMS
Máxima velocidad angular del eje motor sin carga (rpm)	2390
Máximo par motor	16,6 kgm a 1300 rpm
Mínima velocidad angular del eje motor (rpm)	600

Tabla 1. Principales características del motor diésel usado para los ensayos

Además del motor, el banco de prueba está provisto de un dinamómetro eléctrico Froment modelo XT200 con una potencia máxima de 136 kW ± 1.44 kW de precisión al 100% de la velocidad del motor, este incluye en su funcionamiento el medidor de velocidad del motor (tacómetro), el cual se utilizó para estos fines con una precisión de ± 5 rpm. El consumo de combustible fue medido con un flujómetro electrónico Froment FM502.

Los resultados obtenidos (consumo específico de combustible y potencia) durante el ensayo de los diferentes combustibles en el motor, a plena carga y diferentes rpm, fueron corregidos teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas según la norma SAE J1349.

2.2. Caracterización de los combustibles ensayados

El biodiesel empleado (orujo y girasol) fue obtenido en condiciones de laboratorio en el Departamento de Química de la Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, España, a partir de un estudio previo de optimización de las cantidades de sustancias que intervienen en la reacción y la cinética de la misma. Para este fin fue empleada una relación peso hidróxido de potasio-aceite y etanol-aceite de 1,3% y 30% respectivamente. La reacción de transesterificación para ambos combustibles se desarrolló a 60°C durante 40 minutos de reacción con agitación vigorosa de los reactantes. Ya que a partir de los 40 minutos de reacción en el estudio previo de cinética de reacción no se incrementaba la conversión en ésteres. Luego de la separación de las fases (biodiesel y glicerina), el combustible fue lavado con agua para su posterior utilización en el motor. Las principales propiedades determinadas a los combustibles obtenidos se muestran en la tabla 2 de forma comparativa con el diésel.

Propiedades	U/M	Estándar Diésel EN 590	Estándar Biodiesel EN14214	Biodiesel de orujo	Biodiesel de girasol
Contenido en ésteres	% (w/w)	-	>96,5	97.72	97.66
Densidad (15°C)	kg/m ³	820-845	860-900	876	875
Viscosidad (40°C)	mm ² /s	2.00-4.50	3.50-5.00	4.53	4.61
Punto de inflamación	°C	>55	>120	138	182
Número de cetano	-	>51.0	>51.0	58.7	52.3
Corrosión láminas de cobre	-	1	1	1a	1a
Estabilidad a la oxidación (110°C)	h	-	>6.00	15.5	16.25

Tabla 2. Principales propiedades de los combustibles obtenidos

3. Discusión de los resultados

Los ensayos en banco de prueba fueron realizados durante el funcionamiento del motor con B100, B20 (correspondientes al biodiesel de orujo y girasol) y Diésel de forma comparativa a plena carga (curva característica exterior de velocidad) y rpm variable. Los principales parámetros estudiados fueron la potencia entregada por el motor y el consumo específico de combustible. A continuación se muestran los gráficos 1 y 2 que describen el funcionamiento de la potencia al freno desarrollada por el motor para B100 y B20 correspondientes a aceite de orujo y girasol.

En este caso la mayor potencia entregada, tanto para el B20 como para el B100 se alcanzó mientras el motor funcionaba con biodiesel derivado de aceite de orujo. Esto es debido fundamentalmente a la diferencia entre el poder calórico inferior de ambos biodiesel. Cuyos valores, calculados a partir de la medición del poder calórico superior en un calorímetro, IKA C 200, varían desde 35477 J/g hasta 37597 J/g para el caso del biodiesel de girasol y orujo respectivamente. De igual modo durante el funcionamiento del motor con diésel la potencia alcanzada es máxima (gráfico 3), correspondiéndose con su mayor poder calorífico inferior de 43567 J/g.

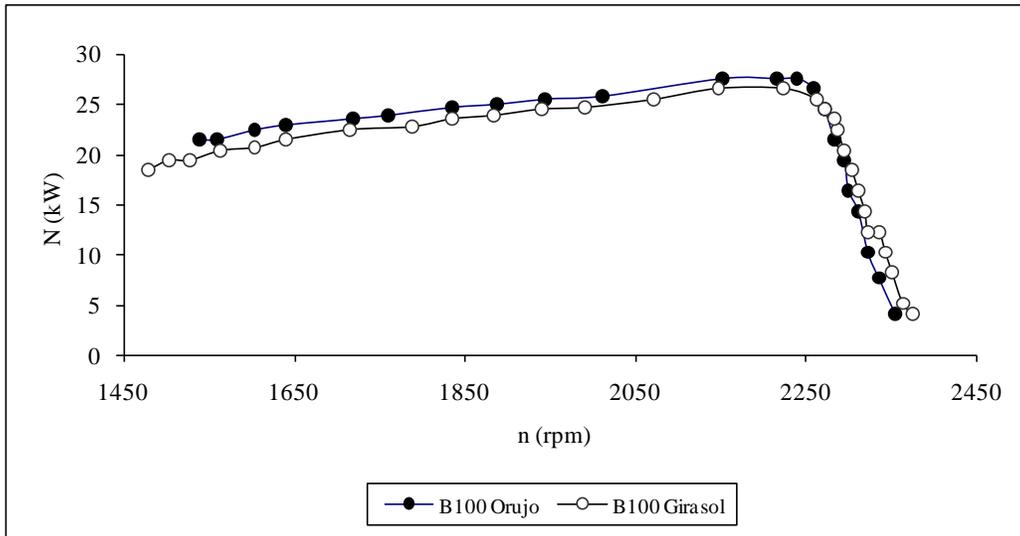


Gráfico 1. Comportamiento de la potencia desarrollada por el motor durante su funcionamiento con biodiesel puro (B100) de orujo y girasol

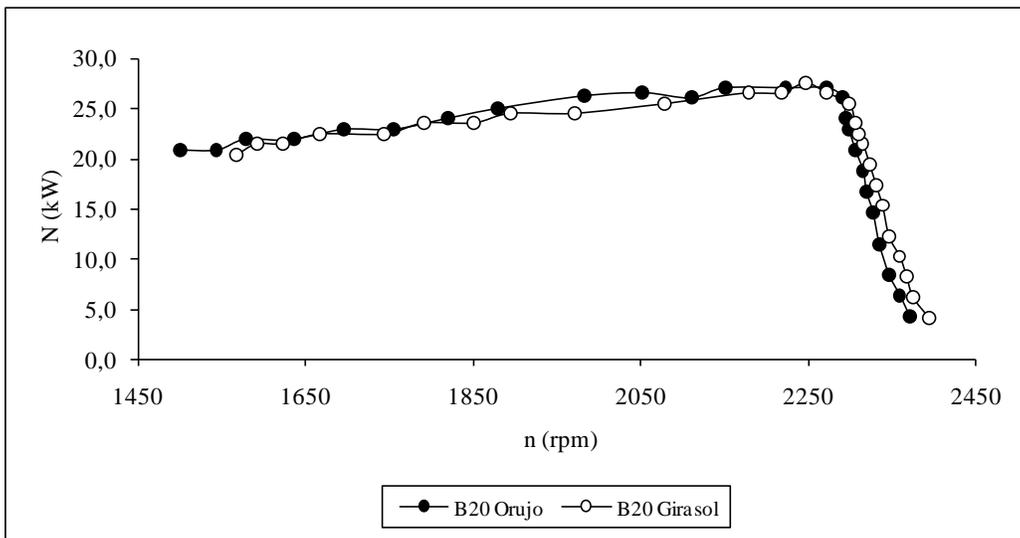


Gráfico 2. Comportamiento de la potencia desarrollada por el motor durante su funcionamiento con B20 de orujo y girasol

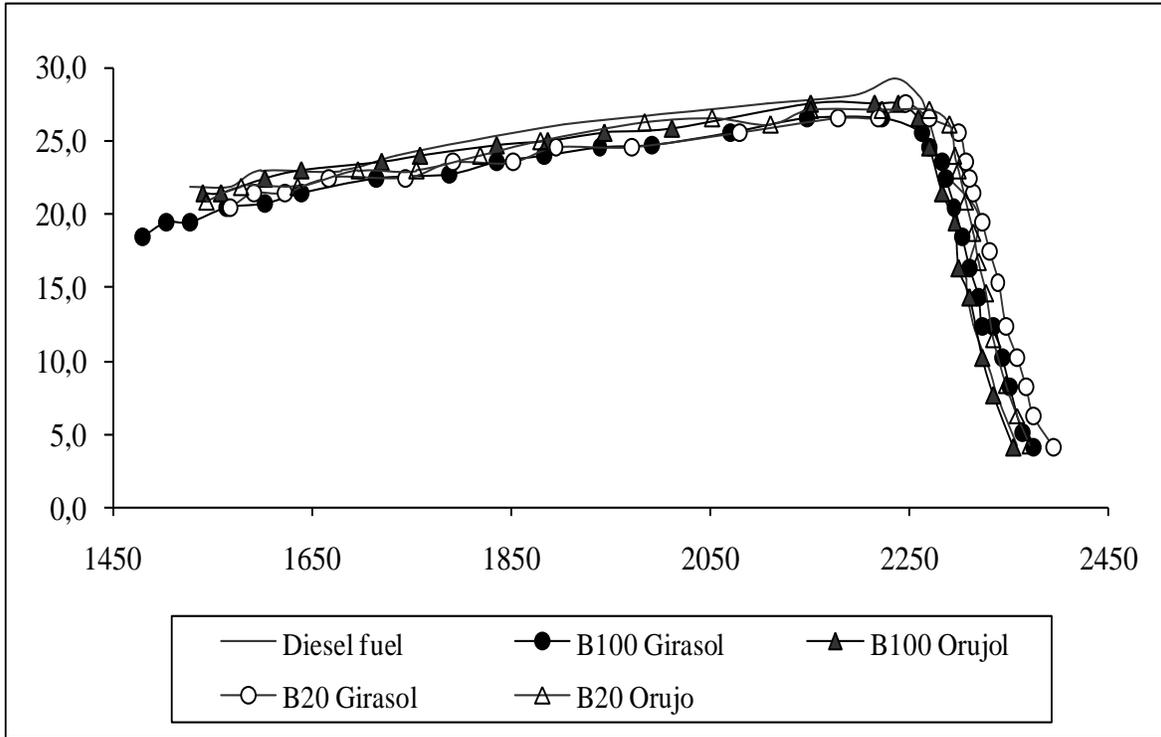


Gráfico 3. Comportamiento de la potencia desarrollada por el motor durante su funcionamiento con B20 y B100 de orujo y girasol de forma comparativa con el diésel

La disminución de la potencia máxima desarrollada por el motor con respecto al diésel se incrementó a medida que la cantidad de biodiesel en la mezcla aumenta, esta fue de un 5% y 7% durante su funcionamiento con B20 de orujo y girasol; mientras que con B100 resulto de un 7% y 9% respectivamente.

En el caso del consumo específico de combustible correspondiente a la velocidad de rotación del motor en la que se alcanza la potencia máxima este se incrementó con respecto al diésel en un 9% y 11% cuando se empleó B20 y en un 14% y 15% para el caso del B100 de orujo y girasol respectivamente.

Además se verificó un comportamiento similar del consumo específico en la zona en que este alcanza su valor mínimo (aproximadamente a 2284 rpm), constatándose un incremento del mismo con respecto al diésel de 7% y 11% para el B20 y 14% y 17% para el B100 de orujo y girasol en su orden de aparición. Los resultados vinculados al consumo específico de combustible se pueden apreciar en sus gráficos de comportamiento 4, 5 y 6.

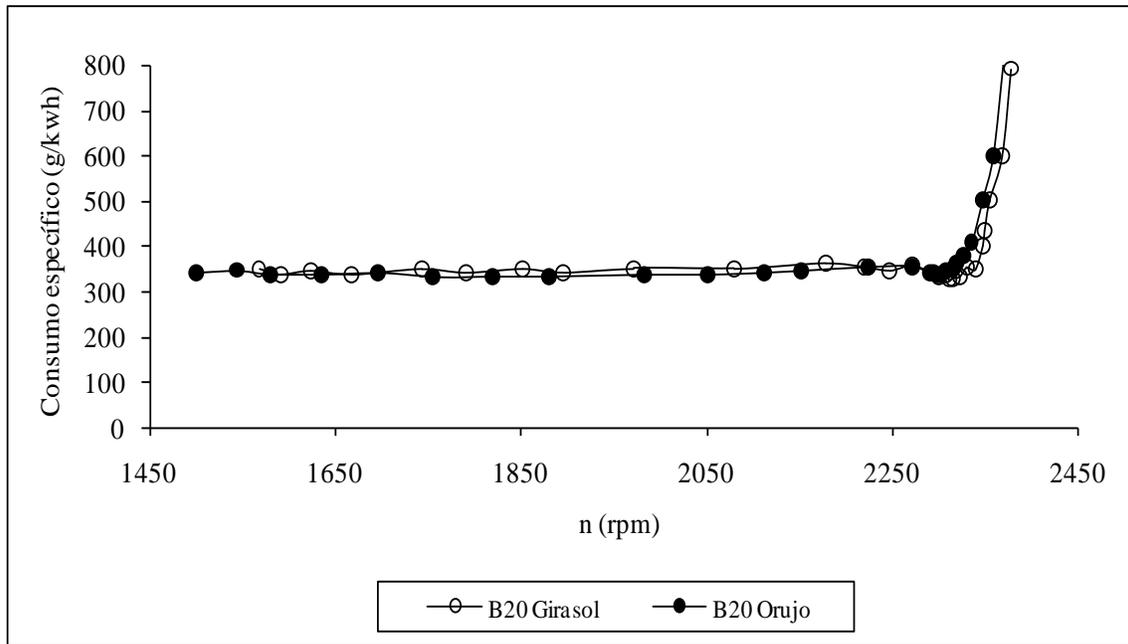


Grafico 4. Comportamiento del consumo especifico de combustible del motor durante su funcionamiento con B20 de orujo y girasol

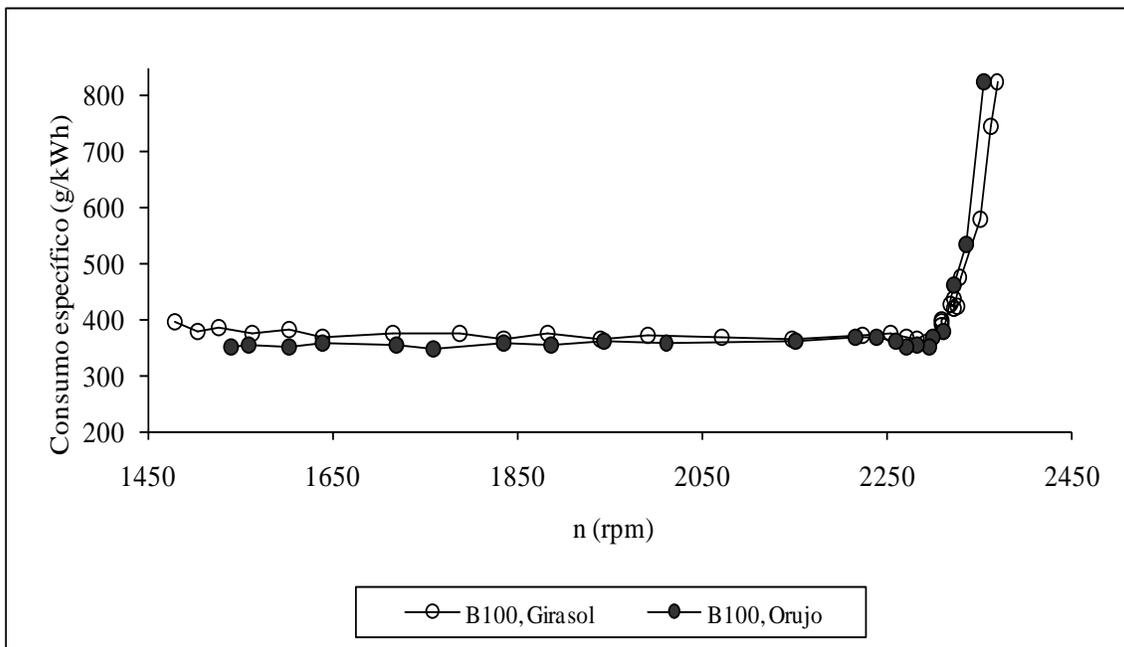


Grafico 5. Comportamiento del consumo especifico de combustible del motor durante su funcionamiento con B100 de orujo y girasol

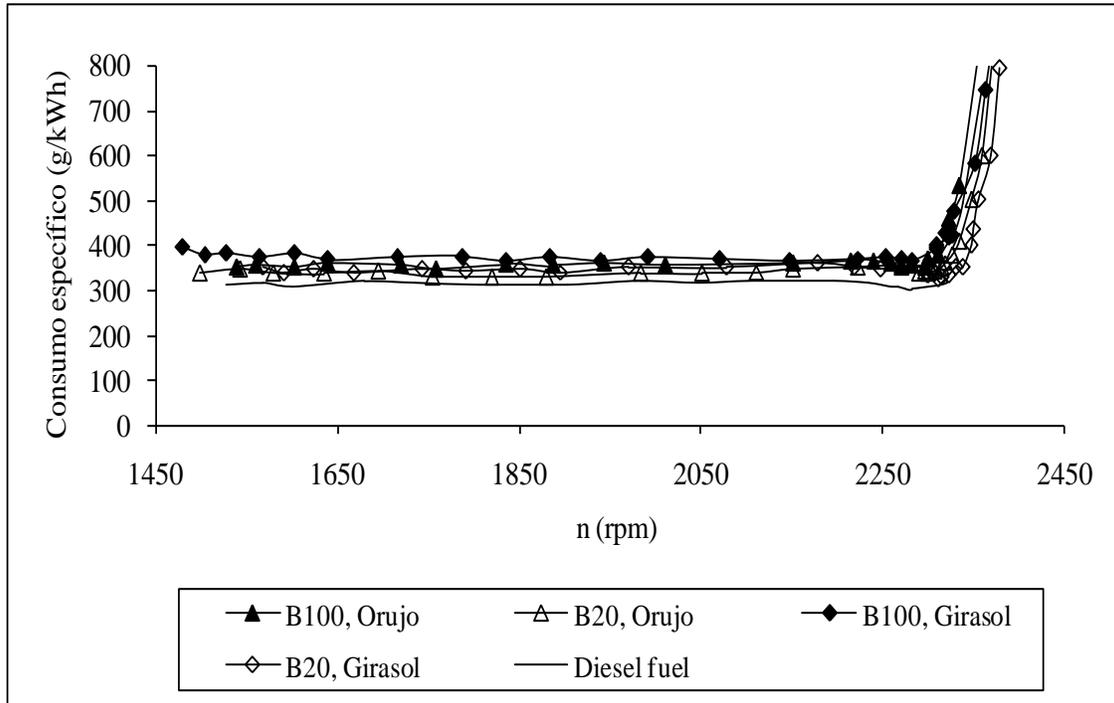


Gráfico 6. Comportamiento del consumo específico del motor durante su funcionamiento con B20 y B100 de orujo y girasol de forma comparativa con el diésel

CONCLUSIONES

- Durante el funcionamiento del motor con los combustibles ensayados la potencia máxima del motor disminuye respecto al diésel a medida que la cantidad de biodiesel en la mezcla aumenta, esta fue de un 5% y 7% durante su funcionamiento con B20 de orujo y girasol; mientras que con B100 resulto de un 7% y 9% respectivamente. Esta pérdida de potencia se debe fundamentalmente al menor valor calórico del biodiesel y las mezclas.
- El consumo específico de combustible correspondiente a la velocidad de rotación del motor en la que se alcanza la potencia máxima se incrementa con respecto al diésel en un 9% y 11% cuando se emplea B20 y en un 14% y 15% para el caso del B100 de orujo y girasol respectivamente. Y en la zona en que este alcanza su valor mínimo (aproximadamente a 2284 rpm), se incrementó en un 7% y 11% para el B20 y 14% y 17% para el B100 de orujo y girasol en su orden de aparición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agarwal, D. and A. K. Agarwal (2007). "Performance and emissions characteristics of Jatropha oil (preheated and blends) in a direct injection compression ignition engine". *Applied Thermal Engineering* **27**(13): 2314-2323.
2. Agarwal, D., L. Kumar, et al. (2008). "Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine". *Renewable Energy* 1147-1156.
3. Altın, R., S. Çetinkaya, et al. (2001). "The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines". *Energy Conversion and Management* **42**(5): 529-538.
4. Arzamendi, G., E. Arguiñarena, et al. (2006). "Monitoring of biodiesel production: Simultaneous analysis of the transesterification products using size-exclusion chromatography". *Chemical Engineering Journal* **122**(1-2): 31-40.
5. Aydin, H. and H. Bayindir (2010). "Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine". *Renewable Energy* **35**(3): 588-592.
6. Berchmans, H. J. and S. Hirata (2008). "Biodiesel production from crude Jatropha curcas L. seed oil with a high content of free fatty acids". *Bioresource Technology* **99**(6): 1716-1721.
7. Bouaid, A., M. Martinez, et al. (2007). "A comparative study of the production of ethyl esters from vegetable oils as a biodiesel fuel optimization by factorial design". *Chemical Engineering Journal* **134**(1-3): 93-99.

8. Canakci, M. and M. Hosoz (2006). "Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with various biodiesels". Energy Sources Part B-Economics Planning and Policy **1**(4): 379-394.
9. Canakci, M., C. Sayin, et al. (2008). "Exhaust Emissions and combustion characteristics of a direct injection (DI) diesel engine fuelled with methanol-diesel fuel blends at different injection timings". Energy & Fuels **22**(6): 3709-3723.
10. Darnoko D and C. M (2000). "Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor" Journal of the American Oil Chemists Society **77**(12): 1263-1267.
11. De, B. K. and B. D. K. (1999). "Biodiesel from minor vegetable oils like karanja oil and nahor oil". Lipid Fett **101**(10): 404-406.
12. Demirbas, A. (2008). "Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats". Energy Conversion and Management **49**(1): 125-130.
13. Dorado, M. P. (1995). Comportamiento de los motores diésel con mezclas de gasoil y aceite de girasol en ensayos de larga duración. Córdoba, Universidad de Córdoba.
14. Dorado, M. P. (2001). Desarrollo y ensayo de nuevos biocombustibles para motores diesel precedentes de diversas semillas oleaginosas y de grasas vegetales usadas. Tesis doctoral.
15. Dorado, M. P. (2002). Desarrollo y ensayo de nuevos biocombustibles para motores diesel procedentes de diversas semillas oleaginosas y de grasas vegetales usadas. Córdoba, Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba.
16. Dorado, M. P., J. M. Arnal Almenara, et al. (2002). "The effect of waste vegetable oil blend with diesel fuel on engine performance". Transactions of ASAE **45**(3): 519-523.
17. Dorado, M. P., E. Ballesteros, et al. (2003). "Testing waste olive oil methyl ester as a fuel in a diesel engine". Energy & Fuels **17**(6): 1560-1565.
18. Dorado, M. P., E. Ballesteros, et al. (2003). "Testing waste olive oil methyl ester as a fuel in a diesel engine". Energy & Fuels **17**(6): 1560-1565.
19. Dorado, M. P., E. Ballesteros, et al. (2004). "Optimization of alkali-catalyzed transesterification of Brassica carinata oil for biodiesel production". Energy & Fuels **18**(1): 77-83.
20. Dorado, M. P., E. Ballesteros, et al. (2004). "Kinetic parameters affecting the alkali-catalyzed transesterification process of used olive oil". Energy & Fuels **18**(5): 1457-1462.
21. Dorado, M. P., J. A. de Almeida, et al. (2002). "An alkali-catalyzed transesterification process for high free fatty acid feedstocks". Transactions of ASAE **45**(3): 525-529.
22. Encinar, J. M., J. F. Gonzalez, et al. (2002). "Biodiesel Fuels from Vegetable Oils: Transesterification of Cynara cardunculus L. Oils with Ethanol". Energy & Fuels **16**(2): 443-450.
23. FAO (2008). BIOFUELS: prospects, risks and opportunities *The state of food and agriculture (SOFA) 2008*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
24. Geo, V. E., G. Nagarajan, et al. (2009). "Experimental investigations to study the characteristics of rubber-seed-oil-fueled diesel engine supplemented with diethyl ether". Energy & Fuels **23**(1): 533-538.
25. Gerpen, J. V. (2005). "Biodiesel processing and production". Fuel Processing Technology **86**(10): 1097-1107.
26. Gokalp, B., H. S. Soyhan, et al. (2009). "Biodiesel addition to standard diesel fuels and marine fuels used in a diesel engine: Effects on emission characteristics and first- and second-law efficiencies". Energy & Fuels **23**: 1849-1857.
27. Haldar, S. K. N., A. (2008). "Utilization of Three Non-Edible Vegetable Oils for the Production of Biodiesel Catalysed by Enzyme" The Open Chemical Engineering Journal **2**(1): 79-83.
28. Hasimoglu, C., M. Ciniviz, et al. (2008). "Performance characteristics of a low heat rejection diesel engine operating with biodiesel". Renewable Energy **33**(7): 1709-1715.
29. Konandreas, P. S., J. (2007). "Global Biofuel Production Trends and Possible Implication of Swaziland". *Food and Agricultural Organization of United Nations (FAO)*.
30. Kumar, N. and P. B. Sharma (2005). "Jatropha curcus - A sustainable source for production of biodiesel". Journal of Scientific & Industrial Research **64**(11): 883-889.
31. Labeckas, G. and S. Slavinskis (2006). "The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection Diesel engine performance and exhaust emissions". Energy Conversion and Management **47**: 1954-1967.
32. López, D., I (2006). "Biodiesel, una alternativa energética para el sector agrícola en Cuba". Conferencia Internacional Ingeniería Mecánica.

33. Mittelbach, M. and C. Remschmidt (2004). Biodiesel: The Comprehensive Handbook. Graz, Austria, Martin Mittelbach.
34. Om Tapanes, N. C., D. A. Gomes Aranda, et al. (2008). "Transesterification of Jatropha curcas oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction". Fuel **87**(10-11): 2286-2295.
35. Öner, C. and S. Altun (2009). "Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine". Applied Energy **86**(10): 2114-2120.
36. Peterson, A. M., P. I. Lee, et al. (2009). Effects of B20 on combustion, emissions and performance of a light-duty diesel engine. New York, Amer Soc Mechanical Engineers.
37. Peterson, C. L., J. L. Cook, et al. (2002). "Continuous flow biodiesel production". Applied Engineering in Agriculture **18**(1): 5-11.
38. Piloto, R. (2009). Tesis doctoral. Determinación de la influencia en el funcionamiento de motores diesel del uso de biodiesel. CETER Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría".
39. Pinzi, S., F. Priego Capote, et al. (2008). Optimization and Automatic On-Line Monitoring of Biodiesel Production from Vegetable Oils. Alternative Fuels 2008, Maribor, Slovenia.
40. Prakash, N., A. Arul Jose, et al. (2006). "Optimization of Karanja oil Transesterification". Indian Journal of Chemical Technology **13**.
41. Ramadhas, A. S., S. Jayaraj, et al. (2005). "Biodiesel production from high FFA rubber seed oil". Fuel **84**(4): 335-340.
42. Sabudak, T. and M. Yildiz (2010). "Biodiesel production from waste frying oils and its quality control". Waste Management **30**(5): 799-803.
43. Sivaprakasam, S. and C. G. Saravanan (2007). "Optimization of the Transesterification Process for Biodiesel Production and Use of Biodiesel in a Compression Ignition Engine". Energy & Fuels **21**: 2998-3003.
44. Sureshkumar, K., R. Velraj, et al. (2008). "Performance and exhaust emission characteristics of a CI engine fueled with Pongamia pinnata methyl ester (PPME) and its blends with diesel". Renewable Energy **33**: 2294-2302.
45. Usta, N. (2005). "An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester". Energy Conversion and Management **46**(15-16): 2373-2386.
46. Vicente, G., A. Coteron, et al. (1998). "Application of the factorial design of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production". Industrial Crops and Products **8**(1): 29-35.
47. Vicente, G., M. Martinez, et al. (2005). "Kinetics of sunflower oil methanolysis". Industrial & Engineering Chemistry Research **44**(15): 5447-5454.